



УДК 550.8

МОДЕЛЮВАННЯ В НАФТОГАЗОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

В.Білецький¹, П.Сергєєв², М.Фик¹, С.Козирець¹

¹ Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

² Донецький національний технічний університет, м. Покровськ, Україна

* Автори: електронна адреса ukcdb@i.ua, тел. +380 (067) 717-80-68.

MODELING IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

V. Biletsky¹, P. Sergeev², M. Fyk¹, S. Kozirets¹

¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

² Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine

* Authors: e-mail ukcdb@i.ua, tel. +380 (067) 717-80-68.

ABSTRACT

Goal. The aim of the work is to review and analyze the current state of modeling of oil and gas deposits and deposits, technological processes and devices used in the oil and gas industry. The task of the article is to include in the scientific revolution the positive experience of modeling, to concentrate the attention of scientists and practitioners to new possibilities of mathematical modeling in oil and gas geology and engineering.

Methods. Mathematical and physical modeling.

Results. The review and analysis of the main modeling objects in the oil and gas industry - deposits, the process of drilling wells, technological processes and devices of oil and gas fields, transport of fluids and pulps. Specific features of modeling objects, modeling methods, software, specific modeling examples of individual objects are given. Prospective directions of development of mathematical modeling of key objects in the oil and gas industry are determined.

Scientific novelty. Systematically analyzed the main modeling objects in the oil and gas industry, modern methods and software products used for modeling.

Practical significance. Attracted to scientific practice is the positive experience of modeling objects in the oil and gas industry - deposits, the process of drilling wells, technological processes and devices of oil and gas fields, fluid transport and pulps.

Keywords: oil and gas industry, mathematical modeling, experiment planning, geological modeling, rotatable plans, simplex-centroid plans, Simulation // SolidWorks.

1. ВСТУП

Постановка проблеми і стан її вивчення. Питання моделювання в нафтогазовій промисловості доцільно розглядати в плані основних об'єктів, та технологічних процесів і пристроїв, які використовуються при бурінні, видобуванні, транспорті та зберіганні, первинній та вторинній переробці вуглеводневих флюїдів.

Виходячи з цього слід виділити: 1. Розробку статичної (геологічної) і фільтраційної (гідродинамічної) моделі нафтогазового родовища. 2. Моделювання процесу буріння свердловин. 3. Моделювання технологічних процесів і пристроїв, які використовуються при переробці флюїдів. 4. Моделювання характерних технологічних розчинів, які використовуються у нафтогазовій справі, зокрема,

бурових та цементувальних розчинів. 5. Моделювання і аналіз міцності, стійкості, тепломасопередачі, течії флюїдів, динаміки механізмів, газо / гідродинаміки за допомогою комплексних програмних комплексів (SolidWorks та його аналоги). 6. Моделювання процесів гідро/пневмотранспорту (включно з магістральним). Сьогодні всі названі напрямки моделювання знаходяться в Україні і світі на різних стадіях розробленості. У вітчизняній практиці моделювання окремих об'єктів нафтогазової галузі до сьогодні не знайшло широкого застосування, окремі ресурси моделювання застосовуються епізодично.

Мета роботи – огляд і аналіз сучасного стану моделювання покладів та родовищ нафти і газу, технологічних процесів і пристроїв застосовуваних у нафтогазовій промисловості. Задача статті – залучити

у науковий обіг позитивний досвід моделювання, привернути увагу науковців і практиків до можливостей математичного моделювання у нафтогазовій геології та інженерії.

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

1. Геологічна та гідродинамічна моделі нафтогазового родовища

Основною проблемою розробки родовищ є отримання максимального коефіцієнту охоплення та коефіцієнта вилучення вуглеводнів. Для досягнення максимального результату сьогодні активно використовується геологічне моделювання. Побудова тривимірних цифрових геологічних моделей нині вже стала природною складовою технологічних процесів обґрунтування буріння свердловин і складання планів розробки родовищ вуглеводнів, включаючи оцінку економічної ефективності, пропонування геолого-технологічних та екологічних заходів. Значною мірою це пов'язано з ускладненням будови родовищ і новими технологіями видобутку, наприклад, бурінням горизонтальних свердловин, 3D-розгалуження вибійних систем. Разом з тим, це – порівняно молодий напрямок у прикладній нафтогазовій геології, що виник близько 15 років тому [1-9].

Провідними науковими колективами і науковими школами, що займаються розробкою математичних принципів і алгоритмів тривимірного геологічного моделювання, слід згадати роботи вчених в Стенфордському університеті, Норвезькому комп'ютерному центрі, Французькому інституті нафти і Наукової школи в Нансі.

Розвиток програмних пакетів геологічного моделювання забезпечується, з одного боку, появою нових принципів і алгоритмів 3D-моделювання (нейронні мережі, математична статистика, Грід-технології) - розширенням функціональності за рахунок включення і інтеграції нових модулів (аналіз даних сейсморозвідки, супровід буріння горизонтальних свердловин, апскейлінг). Таким чином, тривимірне цифрове геологічне та гідродинамічне моделювання – це ефективний, технічно і економічно доцільний напрямок нафтогазової геології.

Лідерами розробки програмного забезпечення для моделювання є Schlumberger, Landmark Graphics та Roxar Software Solutions. Ця трійка компаній тримає ліву частину ринку в сфері E&P (Engineering & Production). Серед їх клієнтів можна знайти таких нафтових гігантів як: Statoil, Hydro, BP, TotalFinaElf, Philips, Halliburton. PGS, Shell, ChevronTexaco, WinterShal, Conoco, Unocal, OXY, Apache, тощо.

Однак крім них також існує ряд інших фірм, що поставляють програмне забезпечення: Smedvig Technologies, Roxar Software Solutions, Western Atlas, Landmark Graphics, Paradigm Geophysical, CogniSeis, CGG Petrosystems, PGS Tigress, Seismic Microtechnology, GeoMatic, Quick look, Tigress, Western Atlas, DV-Geo та інші.

Порядок роботи з моделями на прикладі використання програмного забезпечення компанії Schlumberger можна побачити на рисунку 1.

В залежності від мети, яку перед собою ставлять розробники, моделі поділяють на такі групи:

- Повномасштабні – моделі для підрахунку запасів та моніторингу процесу розробки
- Секторні – виконуються для групи свердловин та слугують для вирішення проблем по вилученню та динаміці остаточних запасів, оцінці впливу на пласт окремих геолого-технічних заходів
- Навколосвердловинні – слугують для моделювання процесів буріння горизонтальних та бокових стволів

Також моделі можна розподілити за іншими категоріями, наприклад, за повнотою вивчення родовища, чи за актуальністю моделі. За призначенням розрізняють моделі геологічні (статичні) та гідродинамічні.

Створення статичних 3D-моделей вирішує, як правило, наступні завдання:

- підрахунок запасів вуглеводнів,
- планування (проектування) свердловин,
- оцінка невизначеностей і ризиків,
- підготовка основи для гідродинамічного моделювання.

Одним з ключових етапів, що впливають на подальшу технологію створення моделі є аналіз вхідних даних (Рис.2) про об'єкт. Він включає в себе:

- Місця розташування свердловин, таблиці інклінометрії – потрібно мати точні географічні координати кожної свердловини з прив'язкою до їх імен, кути їх нахилу, азимуту та глибини.
- Аналіз положення флюїдних контактів (флюїдна модель) – виділення газоводяних контактів (ГВК), водонафтових контактів (ВНК), газонафтових контактів (ГНК), їх глибини на різних площах родовища
- Аналіз літології – полягає у створенні дискретного тривимірного поля типів порід
- Аналіз колекторів (петрофізична модель) – полягає у визначенні фізичних властивостей породи, що утримує флюїд: коефіцієнти пористості, проникності, насичення, фракційний склад піщаників та ін.
- Фаціальний аналіз (седиментаційна модель) – дає можливість відновити умови осадонакопичення та умови середовища. Включає в себе сейсмофаціальний, біофаціальний та літофаціальний аналізи, а також аналіз загальногеологічних даних
- Аналіз даних сейсморозвідки (сейсмологічна модель та інш. методи розвідки продуктивних площ) – основною метою є отримання так званого «сейсмічного куба», що є основою для створення скелету моделі. Слід зазначити, що отримати якісні дані сейсмічної розвідки в Україні без проведення повторних робіт іноді буває складно. Причина полягає в тому, що більшість родовищ залягають на досить великих глибинах, а дані сейсмічних досліджень майже завжди застарілі, та в силу

недосконалості технологій тих часів, можуть не давати точних показів на глибинах залягання продуктивних горизонтів.



Рисунок 1 - Схема процесу геологічного моделювання

Традиційно технологія геологічного моделювання 3D має наступні основні етапи [5, 9]:

1. Збір, аналіз і підготовка необхідної інформації, завантаження даних.
2. Структурне моделювання (створення каркаса).
3. Створення сітки (3D), осереднення (перенесення) свердловинних даних на сітку.
4. Фаціальне (літологічне) моделювання.
5. Петрофізичне моделювання.
6. Підрахунок запасів вуглеводнів.

Побудована таким чином модель об'єкта розробки використовується потім для прогнозування

і планування видобування, оцінки запасів, комплексної оптимізації процесів та стану пластів.

На заключному етапі моделювання у міру накопичення інформації про об'єкт модель пласта уточнюється, вдосконалюється, відображає нову інформацію про пласти та пластові флюїди, технологічні рішення, застосовувані на родовищі, і може використовуватися для подальшого управління процесом розробки. У цьому випадку можна говорити про постійно діючу геолого - технологічну модель родовища.

Використання геологічних моделей в якості основи для гідродинамічних висуває до них низку вимог, що є несуттєвими для підрахунку запасів, але досить значимими для динамічних розрахунків.

В першу чергу, модель повинна бути детальною: повинна відображати латеральну та вертикальну неоднорідність пласта-колектора.

Також одним з головних критеріїв є реалістичність: геологічна модель повинна відповідати уявленням та знанням про геологічну будову родовища.

Так, наприклад, пласт, складений нашаруванням пісковиків та глин, не може бути представлений одним пластом пісковіку з коефіцієнтом вмісту глини.

Слідування цим простим, але важливим вимогам допомагає побудувати модель, здатну відтворити найбільш точне відображення процесів, що проходять на глибині.

Гідродинамічні моделі слугують для:

- Відстеження процесу відбору запасів (моніторинг розробки)
- Більш точного прогнозу майбутнього відбору продукції
- Моделювання геолого-технічних заходів з інтенсифікації видобутку
- Забезпечення більш зваженого підходу до вибору раціонального варіанту розробки родовищ.

Розробки в області чисельного гідродинамічного моделювання і створення суперкомп'ютерів завжди були взаємопов'язані. Дослідження в чисельному моделюванні почалися наприкінці 50-х років минулого сторіччя як розширення концепції матеріального балансу. Деякі фундаментальні концепції та математичні методи, розроблені протягом перших двох десятиліть досліджень, є актуальними і зараз (кінцево-різницева дискретизація, IMPES, повнонеявний метод, моделі композиційної та «чорної нелеткої нафти», моделі свердловин, та ін.). З появою мейнфреймів і суперкомп'ютерів в 80-х роках і випуском комерційних симуляторів родовищ (наприклад, перший реліз Eclipse був випущений в 1983 р), чисельне та 3D-моделювання стали стрімко розвиватися.

До кінця 90-х років моделювання перестало бути справою тільки вузьких фахівців. В даний час у більшості країн світу законодавчо закріплено вимогу для компаній-операторів підтверджувати проекти розробки родовищ чисельними гідродинамічними моделями.

Наприклад, в 1998 р одна модель Eclipse родовища на Середньому Сході (1600000 активних осередків, більше 500 свердловин, 30 років історії розробки, п'ятикомпонентна модель флюїду) розраховувалася на відповідному 64-процесорному комп'ютері RISC-послуг за 20 год. У 2004 р та ж модель

розраховувалася за 15 год на ПК кластері (вісім процесорів, ОС Linux). Це означає, що для досягнення однакової продуктивності, за 6 років число необхідних процесорів знизилася в 8-10 разів, вартість апаратного забезпечення - в 300 разів.



Рисунок 2 – Вхідні дані для побудови статичної моделі родовища вуглеводнів

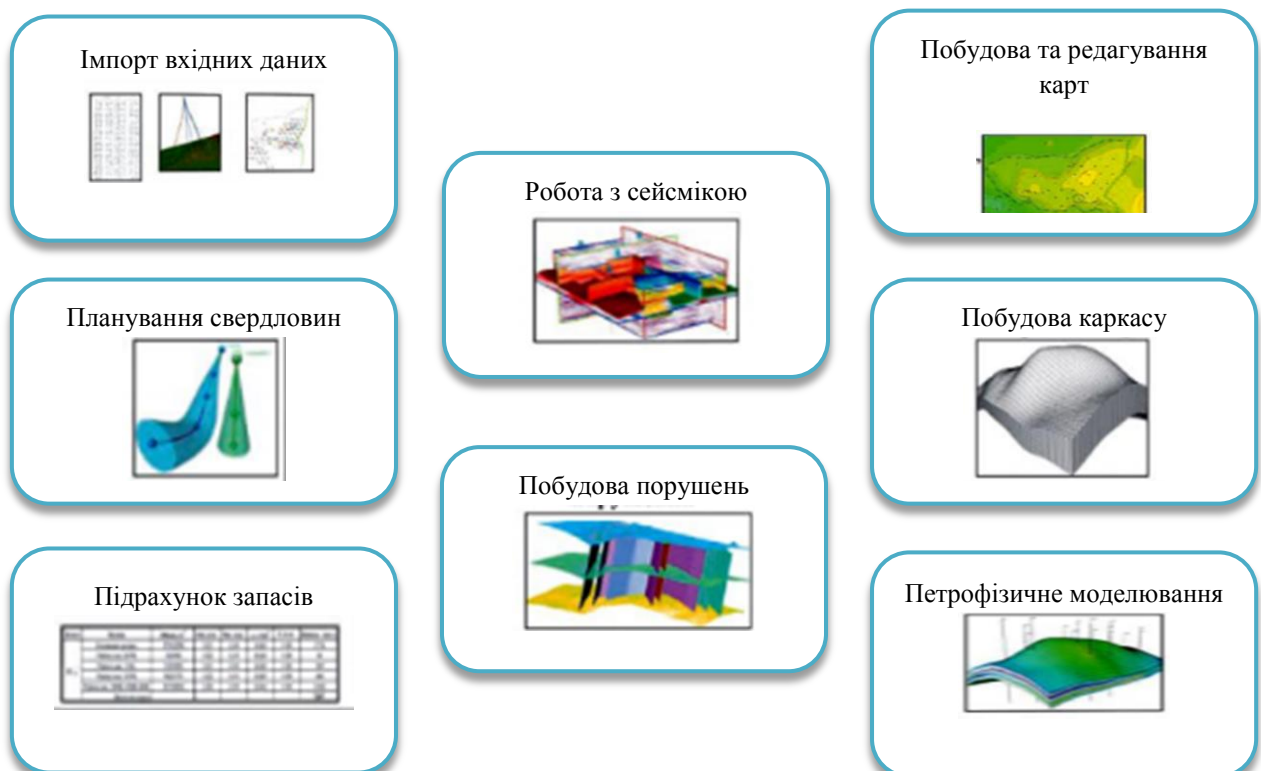


Рисунок 3 - Типовий склад пакета програмного забезпечення при геологічному моделюванні

На рисунку 4 показано процес створення моделі родовища на етапі інтерпретації даних сейсмічної розвідки. Порівнюючи можливості програмного забезпечення компаній Schlumberger, Landmark Graphics та Roxar Software Solutions, слід зазначити, що всі вони мають досить схожий набір функцій:

- Інтерпретація сейсміки
- Кореляція
- Петрофізика
- Інтерпретація ГДС
- Побудова геологічної моделі
- Підрахунок запасів

Ремасштабування моделі
Гідродинамічне моделювання.

Однак, програмні продукти Petrel та Eclipse (Schlumberger) також дають змогу виконувати моніторинг та економічний розрахунок роботи родовища, чого інші програми собі дозволити не можуть.

Процес моделювання родовищ нафти та газу досить складний, та може включати не лише стандартні модулі програмного забезпечення, а й більш специфічні системи.

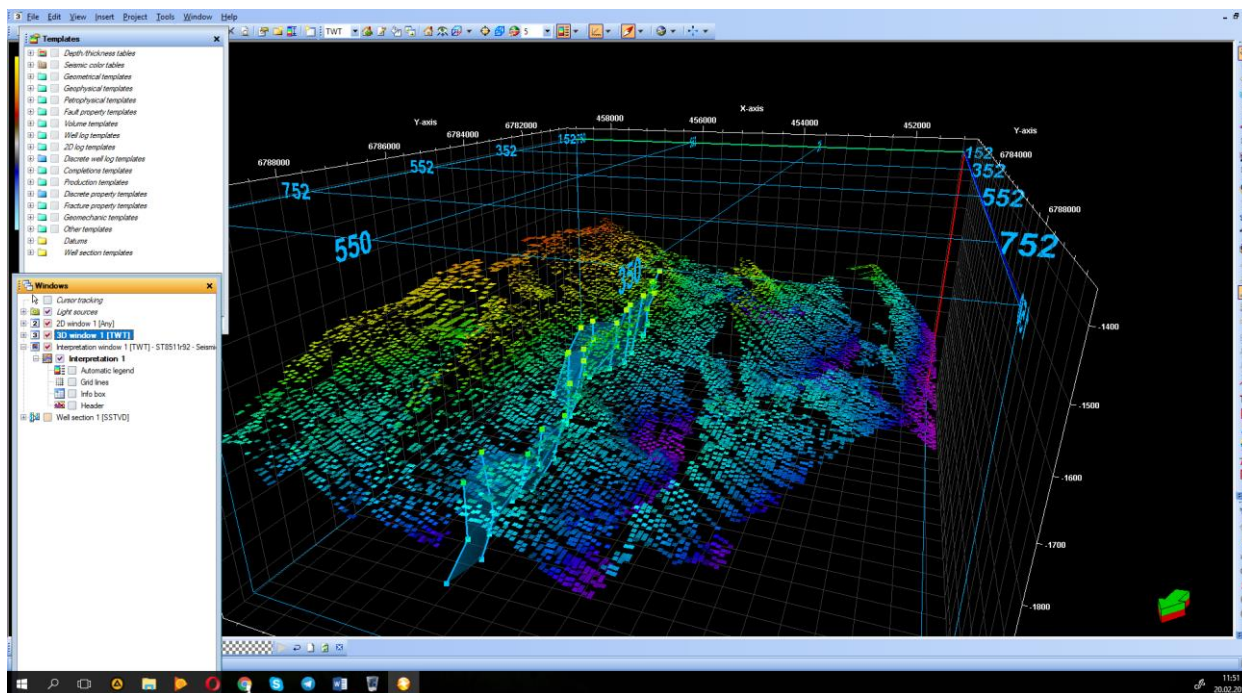


Рис. 4. 3D модель родовища на етапі інтерпретації даних сейсмічної розвідки

До таких систем відносять: LOGGER, Bore Drilling, Well Spacing, ANOT [5, 6, 9].

Система LOGGER служить для візуалізації результатів геофізичних досліджень та виконує наступні функції:

- Графічне відображення каротажних діаграм
- Налаштування візуалізації
- Експорт зображень в формати, необхідні для роботи основних програмних модулів.

Програмний засіб Bore Drilling слугує для формування систем розбурювання та кушуння свердловин. Основні функції:

- Формування схем розміщення свердловин на основі даних розташування пробурених свердловин та водонафтових /газоводяних контактів.
- Візуалізація та налаштування отриманих схем
- Формування схем кушів свердловин
- Додавання горизонтальних стволів

Система Well Spacing виконує функції забезпечення взаємозв'язку між програмними продуктами компаній Schlumberger, Landmark, Roxar та іншими.

Основне призначення системи ANOT полягає в аналізі результатів розрахунків гідродинамічної моделі та допомозі спеціалісту в оформленні проектної документації.

Основні функції:

- Перевірка відповідності режимів роботи свердловин характеру зміни пластового тиску
- Розрахунок середніх дебітів свердловин та короткий економічний опис їх рентабельності
- Візуалізація та експорт звітів у відповідності до регламентних документів.

Геолого-гідродинамічне моделювання набуло значного прискорення розвитку в багатьох країнах Світу та безпосередньо в Україні. Впровадженням програм компанії Schlumberger активно займаються вчені ІФНТУНГ, інституту УкрНДігаз, інституту геофізики ім. Субботіна, фахівці багатьох приватних нафтогазовидобувних підприємств.

2. Моделювання процесу буріння свердловин.

Головна науково-практична задача, яка вирішується моделюванням процесу буріння полягає

в розробці математичної моделі процесу обертального, турбінного та ін.. буріння свердловин, основними елементами якої є залежності механічної швидкості буріння незатупленим породоруйнуючим інструментом (іноді і функції зносу) від технологічних параметрів, властивостей пари «породоруйнуючий інструмент - порода вибою» і часу чистого буріння і яка використовується для опису процесу буріння і його оптимізації. [10-12]

У вітчизняній практиці моделі процесу буріння сформувалися після встановлення В.С. Федоровим залежності механічної швидкості буріння V від навантаження на долото G і частоти його обертання n . В.С. Федоровим отримана емпірична залежність

$$V = a n^x G^y, \quad (1)$$

де x , a , y – коефіцієнти, які враховують характеристики гірського масиву і спосіб буріння; за даними Л.І. Штурмана при турбінному бурінні в породах Каширської світи $x = 0,7$; $y = 1,1$; $a = 0,0024$.

З відомих даних, загальновизнаної моделі процесу буріння немає взагалі. Відомі понад шістнадцять формул залежно від швидкості буріння від навантаження на долото і частоти його обертання, включаючи формулу В.С. Федорова (за даними Л.І. Штурмана і версії Р.А. Бадалова) і формулу буріння Ю.Ф. Потапова і В.В. Симонова. Версію моделі розробили В.К. Маурер, Ван-Лінген, А. Вудс, спільно Еккель, Кеннон і Бінгстейн, також Вардрук і Кеннон. Свої версії запропонували Кетлін, Мюррей, Каннінгхем, Брентлі і Я.А. Гельфгат зі співавторами. Д.С. Роулі, Р.Дж. Хоу і Ф.Х. Ділі розробили спільну модель, самостійно Симон і А.А. Погарський. Р.М. Ейгелес розробив п'ятнадцять моделей.

Утруднення при моделюванні буріння обумовлені багатофакторністю процесу. Аналіз теорії і практики моделювання процесу буріння дозволяє зробити такі узагальнення і висновки:

- Найбільш продуктивними по доступності вимірювання параметрів і управління ними є моделі $V = f(G, n)$ і $V = f(G)$. Просування вибою (буріння) починається з деякої «стартової» швидкості на відповідному «стартовому» навантаженні, необхідному для створення напруженого стану в породі на поверхні вибою.

- Відмінність моделей реального буріння глибоких свердловин від моделей експериментального стендового буріння визначається інтенсифікацією процесу роботи бурильного інструменту після втрати стійкості важким низом і початком його взаємодії зі стінками свердловини.

- Моделі сучасного буріння у вигляді залежностей $V = f(G, n)$ і $V = f(G)$ мають триступеневу форму. У роторному бурінні використовується друга «сходінка». Перша застосовується вкрай рідко в силу малої ефективності. Третя - в силу високої аварійності шарошечних доліт.

- У турбінному бурінні використовується єдина перша ступінь залежності $V = f(G)$. Залежність швидкості буріння від частоти обертання долота в межах використовуваних частот лінійна або

м'яко-степення - зі значенням степеня близьким до одиниці.

- Триступінчасті залежності $V = f(G, n)$ в роторному бурінні зазнають змін з різних причин, в тому числі: кавернозності стовбура свердловини; зміни характеристик гірської породи, насиченості її флюїдом, з не встановлених причин. Найбільше спотворення залежності $V = f(G, n)$ і аварійну ситуацію створює кавернозність.

- В окремих випадках функцією відгуку може бути знос породоруйнуючого інструмента, зміна густини бурового розчину.

3. Моделювання технологічних процесів і пристроїв, які використовуються при переробці флюїдів.

Технологічними процесами нафтових і газових промислів можуть бути: видалення з нафти твердих включень, дегазація, зневоднення, деемульсація знесолення нафти, низькотемпературна сепарація газу, окремі процеси регенерації бурового розчину: грохочення, центрифугування, виділення в циклонах шламової фракції тощо.

Для одержання статистичних моделей цих процесів рекомендується застосовувати математичне моделювання [13].

Активне планування експерименту припускає проведення дослідів відповідно до плану експерименту. План експерименту визначає розташування досвідчених точок у факторному просторі (просторі незалежних змінних). План експерименту задається у вигляді матриці плану, наприклад у вигляді таблиці, кожен рядок якої відповідає умовам досвіду, а стовпець – значенням незалежної змінної в кожному досліді.

План-матриця експерименту пропонується програмою STATGRAPHICS залежно від виду розроблюваної регресійної моделі. У найпростішому випадку розглядається лінійна модель виду:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i \neq j}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (2)$$

де n – число вхідних факторів; Y – оцінка (розрахункове значення) відгуку (цільової функції); b – оцінки коефіцієнтів моделі.

У разі її неадекватності розглянутого процесу використовуються поліноміальні плани другого порядку виду:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i \neq j}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (3)$$

Найбільш часто застосовуються центральні композиційні плани другого порядку.

Їх отримують додаванням спеціальних «зоряних» точок до «ядра», що складається з плану $2n$ для лінійної моделі, а також певної кількості експериментів в центрі плану (при фіксації значень всіх вхідних параметрів на нульовому рівні). Зоряні точки встановлюються на деякій відстані d від центру, званому «зоряним плечем».

Серед центрально-композиційних планів другого порядку найбільшого поширення набули ротатбельні плани.

Ці плани дають можливість передбачати значення функції відгуку з дисперсією (точністю), однаковою на рівних відстанях від центру плану (по всьому факторному простору).

Після складання план-матриці експериментів здійснюється реалізація відповідних їй дослідів. За результатами цих дослідів визначаються експериментальні значення цільової функції, які заносяться в план-матрицю експерименту порядково.

Етапи планування експерименту здійснюються безпосередньо в модулі DOE програми STATGRAPHICS.

4. Моделювання бурових та цементувальних розчинів.

У практиці переробки корисних копалин, будівельній, хімічній, нафто-газовій промисловості часто доводиться вирішувати завдання оптимізації складу багатокомпонентної суміші – наприклад, визначення оптимального гранулометричного складу вихідної сировини збагачувальних апаратів, складу композиційних реагентів, складу бурових та цементувальних розчинів і т.п.

Звичайні методи активного планування експерименту в даному випадку застосувати не можна, так як на

Статистичну математичну модель технологічного процесу одержують у вигляді полінома, наприклад:

$$W = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 - a_3X_3 - a_4X_4 + a_1a_2X_1 \cdot X_2 + a_1a_3X_1 \cdot X_3 - a_1a_4X_1 \cdot X_4 - a_{22}X_2^2 - a_2a_3X_2 \cdot X_3 + a_2a_4X_2 \cdot X_4 + a_3a_4X_3 \cdot X_4$$

На рис. 5 показано узагальнене вікно графічного аналізу отриманого рівняння регресії.

Програма STATGRAPHICS дозволяє провести аналіз полінома, зокрема, одержати Паретто-графік, який показує значимість коефіцієнтів рівняння, порівняти експериментальні (observed) і розрахункові (predicted) значення цільової функції, одержати тримірні поверхні відгуку і контурні криві за якими визначають область оптимуму функції відгуку.

незалежні змінні накладено обмеження:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1; x_i \geq 0 \quad (4)$$

де x_i – вміст і-того компонента в суміші, що з n компонентів, частки одиниці, тобто вміст усіх компонентів у будь-якої суміші завжди дорівнює одиниці або 100%.

У цих випадках застосовують метод активного планування експерименту для дослідження систем склад-властивість. Так як сума часток всіх компонентів, що складають суміш, дорівнює

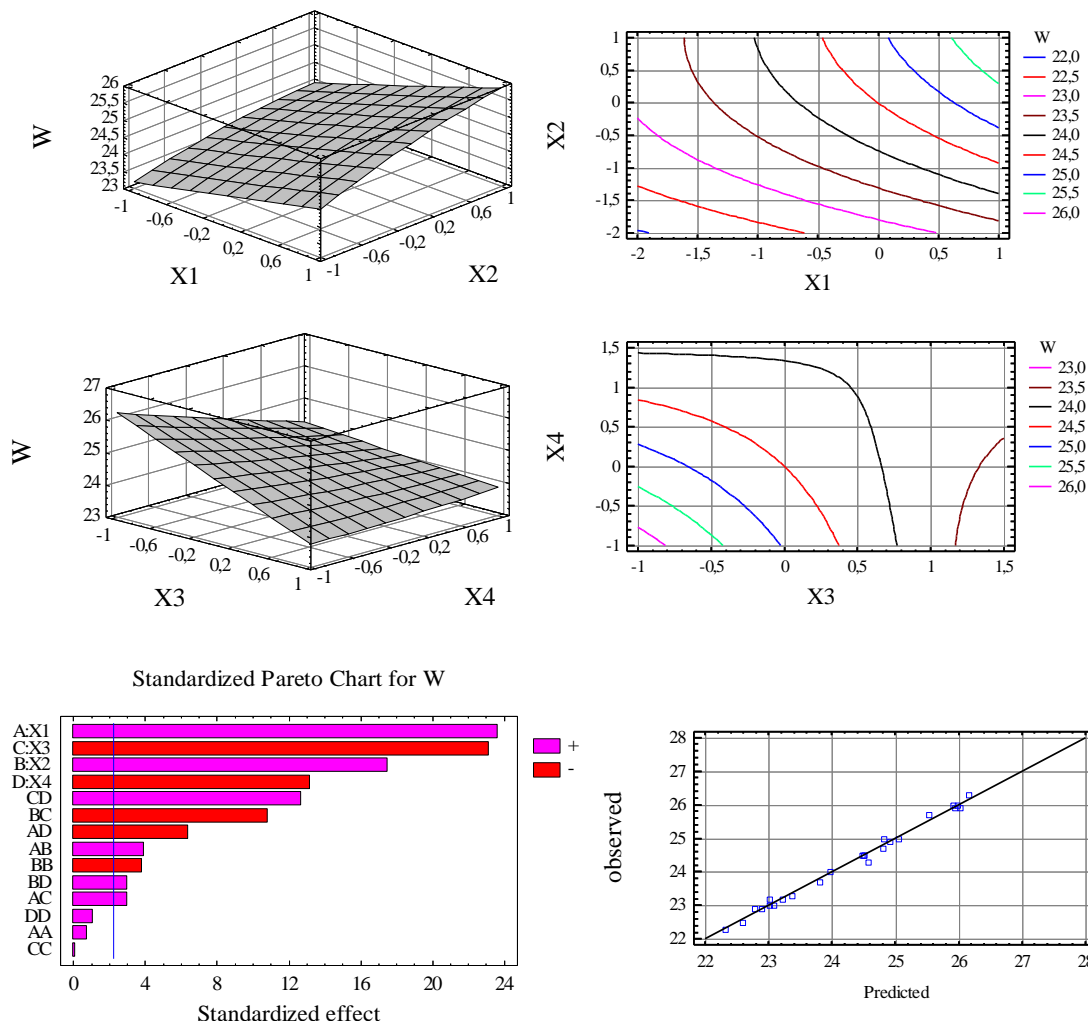


Рис.5. Узагальнене вікно графічного аналізу отриманого рівняння регресії

одиниці, то факторний простір може бути представлено правильним симплексом, для трьох компонентів правильним трикутником, для чотирьох - правильним тетраедром і т.д. Властивості складу досліджуються в наперед заданих точках симплекса, які утворюють так звану симплексну решітку.

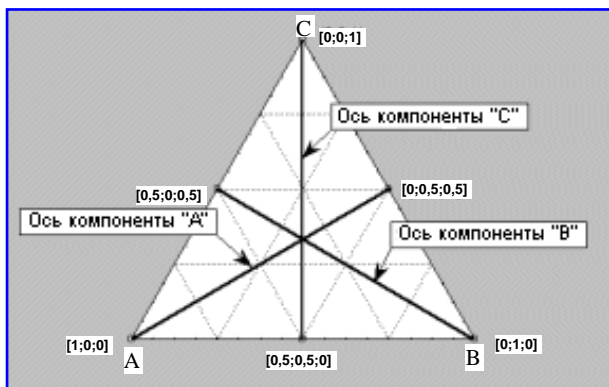


Рис. 6. Трикутна діаграма трикомпонентної суміші.

У разі трикомпонентної суміші кожній точці трикутної діаграми відповідає один, цілком певний склад, а кожному складу відповідає одна точка на діаграмі. У кожній вершині трикутної діаграми вміст одного компонента становить 100%. На протилежній цій вершині стороні вміст цього компонента дорівнює нулю. Сторони трикутника відповідають бінарним сумішам (див. рис. 6).

Розглянемо побудову концентраційного трикутника Гіббса, використововуваного при розробці та аналізі плану експерименту. З кожної вершини правильного трикутного симплекса проведемо висоту, розділимо кожну з них, наприклад, на десять частин і, провівши через отримані ділення прямі, паралельні відповідним сторонам трикутника, отримаємо трикутну сітку (див. рис. 7). Відлік ведемо від точок перетину висот і сторін трикутника. Кожна точка, що лежить в межах трикутного симплекса характеризується трьома координатами (вмістом компонентів А, В і С). Наприклад, точці *a* на рис.7 відповідає такий вміст компонентів: А = 0,2; В = 0,5; С = 0,3.

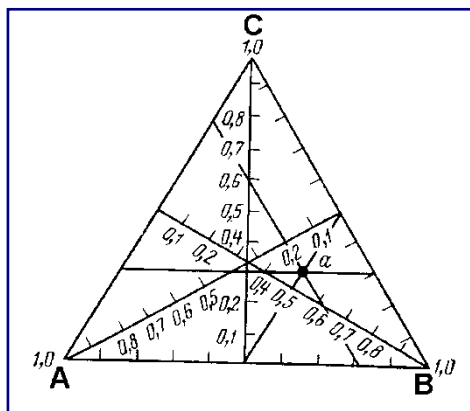


Рис. 7 – Концентраційний трикутник Гіббса

Як правило, поверхні відгуку в багатокомпонентних системах мають вельми складний характер. Для адекватного опису таких

поверхонь використовують поліноми високих ступенів. У разі трикомпонентних систем найбільш часто застосовуються плани другого і третього порядку, з розробкою квадратних і кубічних моделей відповідно.

Вигляд контурних графіків поверхні відгуку при симплекс-центроїдному плануванні показано на рис. 8. Чорною крапкою на обох контурних графіках позначено оптимальне співвідношення вмісту компонентів, що забезпечує максимальне значення цільової функції.

5. Моделювання і аналіз міцності деталей та механізмів, тепломасопередачі, течії флюїдів за допомогою комплексних програмних комплексів (SolidWorks та його аналогів).

Модуль Flow Simulation програмного середовища SolidWorks дає можливість моделювання процесів: - стаціонарні і нестаціонарні течії; - стискування і нестискування (рідини або газу) течії, включаючи до-, транс- і надзвукові режими; - ідеальні і реальні гази; - неньютонівські рідини; - одно і багатокомпонентні течії без хімічних взаємодій і розділення фаз; - спільні розрахунки течії рідини або газу та теплопередачі всередині твердого тіла без наявності границі розділення газ – рідина; - ламінарні і турбулентні течії, враховуючи ламінарний/турбулентний перехід; - «заморожування» течій для розділення «швидких» і «повільних» процесів; - течії в пористих середовищах з урахуванням теплопровідності стінок; - урахування шорсткості стінок; - зовнішні і/або внутрішні течії; - конвекційний теплообмін, вільна, вимушена або змішана конвекція; - радіаційний теплообмін з управлінням прозорістю стінок і розділенням властивостей стінок для теплообміну випромінюванням і сонячною радіацією; - розрахунок траєкторій твердих частинок і крапель в потоці та ін.

Початковими і граничними умовами можуть задаватися наступні вихідні параметри:

- швидкість, тиск (статичний, динамічний, оточуючого середовища), масові та об'ємні витрати;
- температура, концентрація компонентів, параметри турбулентності;
- витратно-напірні характеристики віртуальних вентиляторів;
- різноманітні типи стінок, включаючи шорсткість, коефіцієнт тепловіддачі і параметри умовного середовища на стінках, що не межують з реальним текучим середовищем;
- джерела тепла (об'ємні і поверхневі), віртуальні тепло вентилятори;
- можливості вказати залежність граничних умов та параметрів від часу та координат;
- симетрія відносно базових площин і періодична симетрія.

Результати дослідів виводяться у вікні SolidWorks.

Існує можливість виводу функції на будь-якій площині у вигляді кольорових епюр, векторів та ізоліній, відображення результатів за допомогою ізоповерхонь. За результатами розрахунків можна

створювати трирівневі траєкторії; виводити характеристики розрахунків, розподіл будь-якої характеристикою вздовж будь-якої кривої в MS Excel. Вітчизняними фахівцями накопичено досвід моделювання за допомогою ресурсу SolidWorks ряду об'єктів нафтогазової промисловості, зокрема, гвинтових вибійних двигунів (ГВД), статичних змішувачів, циклонів, елеваторів, засувок, мішалок тощо.

На рис. 9 показано приклад моделювання силової секції ГВД.

При течії флюїдів цим методом отримують параметричні поля тисків, температур, швидкостей течії флюїдів, поля інтенсивності турбулентностей, масштабів турбулентностей та ін..

Для визначення характеру навантажень і точок критичних напружень у деталях та механізмах застосовують модуль Simulation// SolidWorks.

Приклад дослідження поля напружень у елеваторі бурильної колони показано на рис. 10.

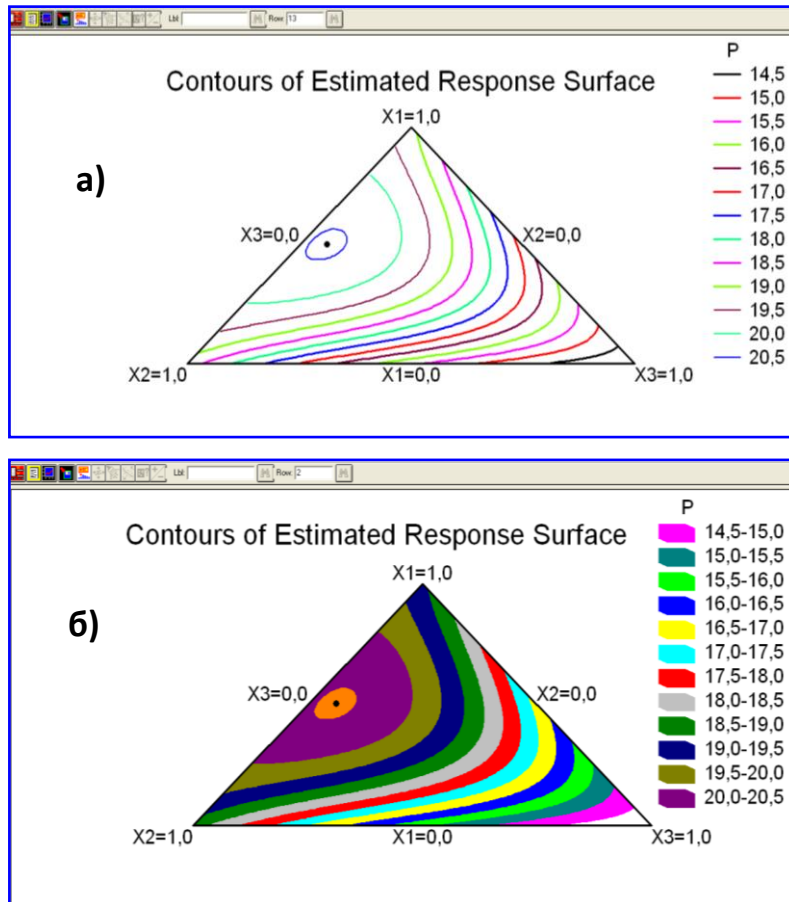


Рис. 8. – Контурні графіки поверхні відгуку

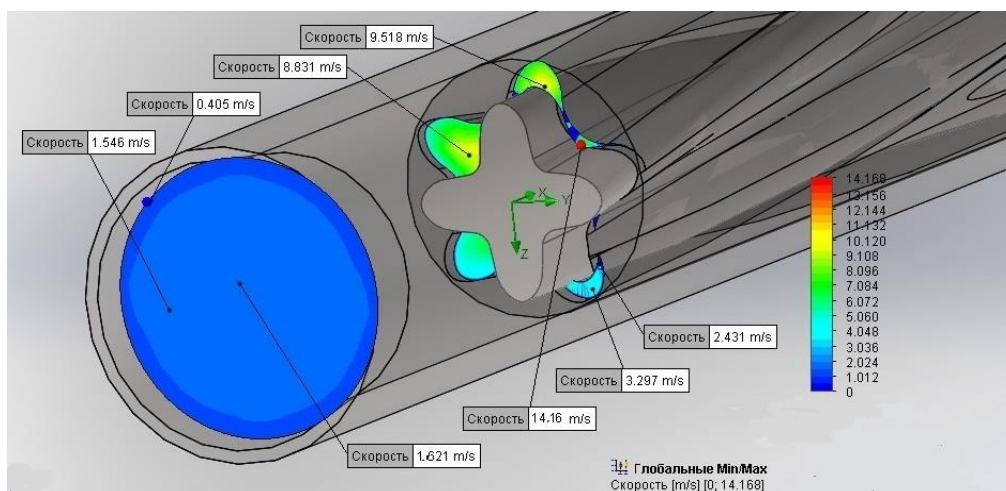


Рис. 9. Модель поля швидкостей в поперечних площинах перерізу робочої пари «ротор – статор» в характерних точках максимуму та мінімуму швидкості.

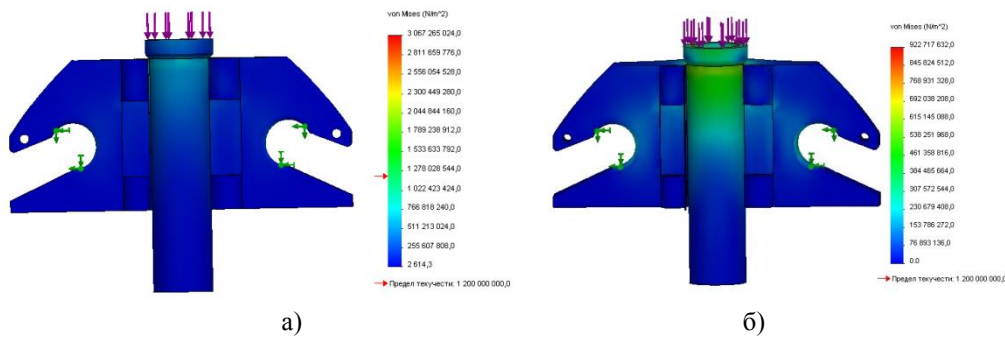
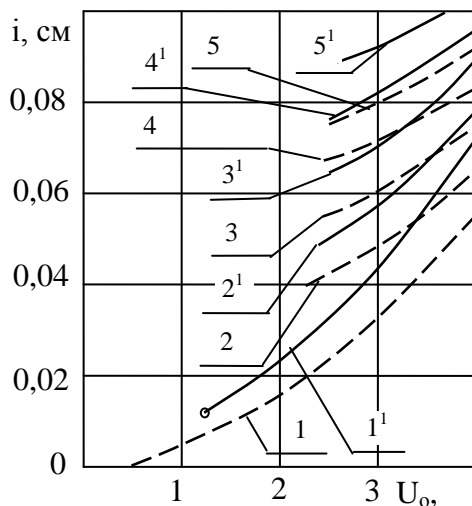


Рис. 10 – Дослідження результатів напруження елеватора бурильної колони при навантаженні 2500 кН = 250 т: а) до модернізації; б) після модернізації.

6. Моделювання процесів гідро/пневмотранспорту флюїдів та пульп

Об'єктом моделювання є процес або самі установки трубопровідного транспорту флюїдів (нафта, природний газ, газовий конденсат, пластова вода) та бурового і цементувального розчинів. При цьому установки трубопровідного транспорту – промислові або магістральні. Як правило, функція відгуку – питомий гідравлічний опір та втрати напору при транспортуванні флюїдів і гідросумішей (рис. 11).



--- Гідравлічно гладкий трубопровід
 — Шорсткий трубопровід

1-1¹ – вода; 2-2¹, 3-3¹, 4-4¹, 5-5¹ – концентрація 3,7; 7,1; 13,2; 16,8 %.

Рис. 11. Залежність питомих гідравлічних опорів i від швидкості пульпи U_0 (м/с) в гідравлічно гладких та шорстких трубах.

Вузлове питання при моделюванні процесів гідро/пневмотранспорту

– вибір моделі – теоретична (математична), емпірична(фізична) чи змішана теоретично-емпірична[15].

Для рідин і газів прийнятні всі три моделі.

Для пульп ситуація ще складніша.

Незавершеність теоретичних розробок у галузі

гідродинаміки потоків, які переносять тверді частинки в завислому стані, з одного боку, та необхідність рішення практичних інженерних завдань при створенні гідротранспортних систем різного призначення – з іншого, визначили два напрямки вирішення цієї проблеми:

- розробки напівемпіричних теорій із виділенням певних ознак, які можуть бути базою для відповідних прикладів переносу твердих частинок потоком рідини, та створення на їх основі методів розрахунку параметрів гідротранспорту визначених груп твердих сипких матеріалів (в т.ч бурових і цементувальних розчинів, шламових сумішей, запінених пульп);

- подальшого розвитку теорії потоків, які переносять тверді частинки в завислому стані, та розробки на основі цього узагальненої (універсальної) методики інженерних розрахунків параметрів гідравлічного транспортування.

3. ВИСНОВКИ

Виконано огляд та аналіз основних об'єктів моделювання в нафтогазовій промисловості – родовищ, буріння свердловин, технологічних процесів та пристроїв нафтових і газових промислів, транспорту флюїдів та пульп.

Визначено характерні особливості об'єктів моделювання, способи моделювання, програмне забезпечення, наведені приклади моделювання окремих об'єктів.

Визначені перспективні напрямки розвитку математичного моделювання об'єктів в нафтогазовій промисловості шляхом цільового використання спеціалізованого програмного забезпечення.

Напрямки подальших досліджень.

Емітаційне, прогнозне, триваєрне та натурне моделювання об'єктів, систем та процесів нафтогазової галузі можуть включати та все частіше демонструють в Україні найсучасніші методології та підходи.

Формат статті не дозволяє охопити відомі та перспективні аспекти галузевого моделювання. Більш широке висвітлення відповідних надбань автори планують виконати в наступній цільовій серії публікацій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стеценко, І.В. Моделювання систем. М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.
2. Mason Buettner. SGS Geostat wins Integra Gold Corp's Gold Rush Challenge / Mason Buettner. // Canadian Mining & Energy. – 2016. Erik Ronald. Rules of Thumb for Geological Modeling / Erik Ronald. // Mining Geology HQ. – 2017. Захарова А.А. Оптимизация процесса цифрового 3D-моделирования месторождений нефти и газа / Захарова А.А., Иванов М.А.. // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – №5. – С. 119–121.
3. Хакимова А.С. Основные этапы геологического моделирования месторождений нефти и газа / Хакимова А.С.. // Символ науки. – 2016. – №8. – С. 35–36.
4. G. Aydin. Production Modeling in the Oil and Natural Gas Industry: An Application of Trend Analysis // Petroleum Science and Technology. Volume 32, 2014 - Issue 5. Pages 555-564.
5. Соколов, В. С. С594 Моделирование разработки нефтяных и газовых месторождений. - Тюмень : ТюмГНГУ, 2014. — 146 с.
6. Kong Chyong Chi. DYNAMICS OF THE UK NATURAL GAS INDUSTRY: SYSTEM DYNAMICS MODELLING AND LONG-TERM ENERGY POLICY ANALYSIS. // Kong Chyong Chi, David M. Reiner, William J. Nuttall. /EPRG Working Paper 0913 Cambridge Working Paper in Economics 0922. - Publication May 2009.
7. Мислюк М.А. Моделювання явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі. Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу. 1999 р.
8. Мулявин С.Ф. Основы проектирования разработки нефтяных и газовых месторождений. Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. - 215 с.
9. Гладков Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование место-рождений нефти и газа: учебное пособие / Е.А. Гладков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского поли-технического университета, 2012. – 99 с.
10. Синев С.В. Модели процесса бурения. // Нефтегазовое дело, 2009. С. 1-23. Электронный ресурс. [Режим доступа]: http://ogbus.ru/authors/Sinev/Sinev_1.pdf
11. Ситников Н.Б. Моделирование и оптимизация процесса бурения геологоразведочных скважин. 2007. / Автореф. дис. работы на соиск. докт. техн.наук. Электронный ресурс. [Режим доступа]: <http://www.dissercat.com/content/modelirovanie-i-optimizatsiya-protsesta-bureniya-geologorazvedochnykh-skvazhin>
12. Ситников Н.Б., Макаров Л.В. Математическая модель процесса бурения глубоких геологоразведочных скважин // Изв. вузов. Горный журнал,- 1992,- №1, - С.62-68. Электронный ресурс. [Режим доступа]: <http://www.dissercat.com/content/modelirovanie-i-optimizatsiya-protsesta-bureniya-geologorazvedochnykh-skvazhin#ixzz3ks200z9X>
13. Сегреєв П. В., Білецький В. С. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин (практикум) — Маріуполь: Східний видавничий дім, 2016. — 119 с.
14. Darin Grosser. The Future of SolidWorks Has 'Always' Been. 2011. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://blog.dasisolutions.com/2011/09/27/the-future-of-solidworks-has-always-been-in-your-hands/>
15. Світлий Ю. Г., Білецький В. С. Гідравлічний транспорт (монографія). — Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, «Редакція гірничої енциклопедії», 2009. — 436 с.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Метою роботи є огляд і аналіз сучасного стану моделювання покладів та родовищ нафти і газу, технологічних процесів і пристроїв застосовуваних у нафтогазовій промисловості. Задача статті – залучити у науковий обіг позитивний досвід моделювання, привернути увагу науковців і практиків до можливостей математичного моделювання у нафтогазовій геології та інженерії.

Методи. Математичне і фізичне моделювання.

Результати. Виконано огляд та аналіз основних об'єктів моделювання в нафтогазовій промисловості – родовищ, процесу буріння свердловин, технологічних процесів та пристроїв нафтових і газових промислів, транспорту флюїдів та пульп. Визначено характерні особливості об'єктів моделювання, способи моделювання, програмне забезпечення, наведені приклади моделювання окремих об'єктів. Визначені перспективні напрямки розвитку математичного моделювання об'єктів в нафтогазовій промисловості.

Наукова новизна. Системно проаналізовано основні об'єкти моделювання в нафтогазовій промисловості та методи і програмні продукти використовувані для моделювання.

Практичне значення. Залучено у науковий обіг позитивний досвід моделювання об'єктів в нафтогазовій промисловості – родовищ, буріння свердловин, технологічних процесів та пристроїв нафтових і газових промислів, транспорту флюїдів та пульп.

Ключові слова: нафтогазова промисловість, математичне моделювання, планування експериментів, геологічне моделювання, ротатбельні плани, симплекс-центроїдні плани, Simulation// SolidWorks.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Целью работы является обзор и анализ современного состояния моделирования залежей и месторождений нефти и газа, технологических процессов и устройств применяемых в нефтегазовой промышленности. Задача статьи – включить в научный оборот позитивный опыт моделирования, привлечь внимание ученых и практиков к возможностям математического моделирования в нефтегазовой геологии и инженерии.

Методы. Математическое и физическое моделирование.

Результаты. Выполнен обзор и анализ основных объектов моделирования в нефтегазовой промышленности - месторождений, процесса бурение скважин, технологических процессов и устройств нефтяных и газовых промыслов, транспорта флюидов и пульп. Определены характерные особенности объектов моделирования, способы моделирования, программное обеспечение, приведены примеры моделирования отдельных объектов. Определены перспективные направления развития математического моделирования объектов в нефтегазовой промышленности.

Научная новизна. Системно проанализированы основные объекты моделирования в нефтегазовой промышленности, методы и программные продукты используемые для моделирования.

Практическое значение. Привлечено в научный оборот позитивный опыт моделирования объектов в нефтегазовой промышленности – месторождений, процесса бурения скважин, технологических процессов и устройств нефтяных и газовых промыслов, транспорта флюидов и пульп.

Ключевые слова: нефтегазовая промышленность, математическое моделирование, планирование экспериментов, геологическое моделирование, ротатбельные планы, симплекс-центроидные планы, Simulation // SolidWorks.

ABOUT AUTHORS

Biletsky Volodymyr, doctor of engineering science, professor of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Sergeev Pavlo, doctor of engineering science, professor of the Donetsk National Technical University

Mykhailo Tyk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Oil and gas recovery, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Kozyrets Sergij, magistrate, Department of Oil and gas recovery, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"